

«хищник-жертва» демонстрирует критическое поведение. В частности, рассмотрены связанные автоколебания на основе системы дифференциальных уравнений типа Розенцвейга-Макартура [1]. Показано, что критическое поведение возникает в случае связанных автоколебаний при стремлении к нулю действительной части числа Ляпунова.

Дилемма Заключенного для связанных систем моделируется на основе эволюционной теории игр. Показано, что критическое поведение связанных систем наблюдается на границе «Дилеммы Заключенного».

1. Dercole F., Ferrière R. et al., Coevolution of slow-fast populations: evolutionary sliding, evolutionary pseudo-equilibria and complex Red Queen dynamics, Proceedings of the Royal Society 273, 983–990 (2006).

## **РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ГАЗОВОГО ПОТОКА В ИДЕАЛЬНОМ ОТВЕРСТИИ. МЕТОД ОБРАТНОГО ЛУЧА**

Мандиева Н.Г. \*, Кузнецов М.А., Породнов Б.Т.

Уральский федеральный университет имени первого Президента России  
Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия

\*E-mail: [mandieva-natalya@mail.ru](mailto:mandieva-natalya@mail.ru)

## **GAS FLOW PARAMETERS DISTRIBUTION IN IDEAL APERTURE. RAY TRACING METHOD**

Mandieva N.G. \*, Kuznetsov M.A., Porodnov B.T.

Ural Federal University, Yekaterinburg, Russia

Ray tracing method used to calculate parameters and velocities in the Knudsen flow through a perfect round hole. It is assumed that in the steady state volume of wall emit particles with the equilibrium Maxwellian distribution function with different numerical density and temperature.

Определение параметров газового потока, возникающего под действием эффекта термомолекулярной разности давлений в свободномолекулярном и промежуточном режимах является актуальной задачей. Её решение может найти прямое практическое применение при разработке систем охлаждения микропроцессоров, проектировании тепловых труб, а также в микроэлектромеханических системах (MEMS-технологии).

Рассмотрим систему, состоящую из плоской перегородки с отверстием радиуса  $R_0$ , которая разделяет два объема газа  $V_1$  и  $V_2$ . Слева от перегородки газ характеризуется параметрами  $(T_1, P_1, n_1)$ , справа –  $(T_2, P_2, n_2)$ . Если при  $t = 0$ ,

$P_1 = P_2$  и  $T_1 > T_2$  открыть отверстие в перегородке, то за счет разности тепловых скоростей  $v_{t1} > v_{t2}$  ( $v_t = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}}$ ) возникает числовой поток в объем  $V_2$ , где давление  $P_2$  возрастает с одновременным уменьшением  $P_1$ . Разность давлений вызывает обратно направленный поток частиц, который в стационарном состоянии уравнивается потоком теплового скольжения [1].

В данной работе используется метод обратного луча. Известно, что в отсутствии межчастичных столкновений, внешних сил и в стационарном режиме уравнение Больцмана сводится к виду  $v \frac{\partial f}{\partial r} = 0$ . Для заданной абсолютной скорости  $v$  производная  $\frac{\partial f}{\partial r} = 0$ , т.е.  $f(v)$  постоянна вдоль направления  $v$  и определяется параметрами и видом  $f(v)$  в местах старта частицы. В соответствии с кинетическим определением получены уравнения для  $n$ ,  $P$ ,  $T$  и макроскопической скорости  $u$  в любой точке  $r$  потока. Алгоритм решения этих уравнений состоит в переходе от интегрирования в декартовом пространстве безразмерных скоростей к интегрированию в цилиндрической системе координат по модулю скорости и углу в полярной системе. Далее осуществляется переход к полярной системе координат физического пространства, ограниченного площадью отверстия или площадью стенок объемов  $V_1$  и  $V_2$ . В точке  $M_2(z, \rho)$ , расположенной в объеме  $V_2$  на расстоянии  $\rho$  от оси симметрии  $z$ , могут оказаться частицы газа одного из трех типов:

1. Частицы, двигающиеся с левой стенки ( $L_1 \rightarrow -\infty$ ) с равновесными  $n_{10}$  и  $T_{10}$  и прошедшие через отверстие в перегородке;
2. Частицы, двигающиеся с правой стенки ( $L_2 \rightarrow +\infty$ ) с равновесными  $n_{20}$  и  $T_{20}$ ;
3. Частицы, двигающиеся с перегородки с температурой  $\bar{T} = \frac{T_{10} + T_{20}}{2}$ .

Проведена отладка программы вычисления этих параметров и получены первые тестовые результаты, удовлетворительно совпадающие с имеющимися данными [2].

1. Коган М.Н., Динамика разреженного газа (кинетическая теория), Наука (1976).
2. Саксаганский Г.Л., Молекулярные потоки в сложных вакуумных структурах, Атомиздат (1980).